Capsules INRSciences

Centre - Eau Terre Environnement
INRS
Université d'avant-garde

Capsule no. 13, mai 2012

Les secrets hydrologiques des tourbières de la baie James[a]

Gwenael Carrer[b]

Pourquoi étudier l'hydrologie des tourbières nordiques?

Les rivières du Moyen Nord québécois constituent une richesse énergétique durable pour le Québec. Les huit barrages qui composent le complexe hydroélectrique La Grande à la baie James (Figure 1) génèrent à eux seuls 39 % de la production hydroélectrique du Québec. Les tourbières sont bien présentes dans le paysage du Moyen Nord québécois. On les retrouve principalement du nord de la forêt boréale au sud de la toundra, entre les latitudes 52 et 57 °N. On estime à 4 millions de kilomètres la superficie du globe recouverte par les tourbières, celles-ci sont situées majoritairement au Canada, en Russie, en Scandinavie et au nord-ouest de l'Europe. Environ 20 % du bassin de la Grande Rivière, où nous effectuons nos recherches, est recouvert de tourbières.

Figure 1 : Carte du bassin versant de la Grande Rivière avec les huit barrages du complexe hydroélectrique.

La production d'hydroélectricité ne se résume pas qu'à la construction de barrages et à l'installation de turbines. La gestion de celle-ci doit également être optimisée selon la demande et en fonction de la capacité de production. Puisqu'il n'est actuellement pas possible de stocker directement de grandes quantités d'électricité (dans des piles par exemple), la rétention d'eau dans un réservoir permet de stocker de l'énergie hydroélectrique pour une production future. Afin de gérer au mieux les niveaux d'eau dans les réservoirs, les ingénieurs d'Hydro-Québec modélisent les écoulements d'eau dans les bassins versants. Pour ce faire, ils entrent dans leurs modèles hydrologiques les prévisions météorologiques pour les heures et les jours à venir (pluie, température, etc.) et obtiennent les futurs apports en eau aux réservoirs. Cependant, les modèles hydrologiques utilisés ne simulent pas toujours convenablement l'effet des pluies sur les débits. La méconnaissance de l'impact des tourbières sur l'hydrologie du vaste bassin versant de la Grande Rivière est probablement l'une des causes. Une meilleure connaissance de ces milieux permettra d'améliorer la modélisation des apports et de prédire les écoulements dans un contexte de changements climatiques.

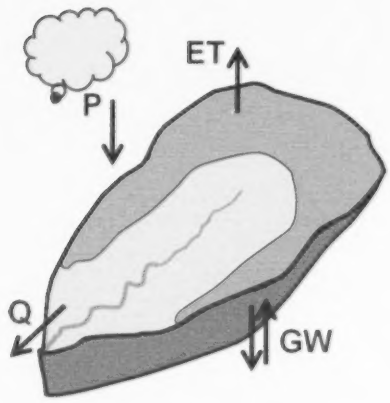
C'est pour ces raisons, entre autres, que des chercheurs du Centre Eau Terre Environnement de l'INRS et leurs partenaires mènent des travaux sur les tourbières du Moyen Nord québécois depuis plusieurs années.

[a] Cette capsule est disponible en ligne à l'adresse suivante : www.ete.inrs.ca/ete/publications#Capsules INRSciences

[b] Étudiant au doctorat sous la supervision des professeurs Alain N. Rousseau (directeur) et André St-Hilaire, INRS – Centre Eau Terre Environnement, et Sylvain Jutras, Université Laval. Contact : gwenael.carrer@ete.inrs.ca

Le bilan hydrologique d'un bassin versant

L'étude du devenir de l'eau dans un bassin versant à l'aide d'un bilan hydrologique est l'une des assises de l'hydrologie. Dans un bassin versant (entité géographique délimitée par la ligne de crête), les gains d'eau proviennent des précipitations et les pertes d'eau sont dues à l'évapotranspiration, l'écoulement à l'exutoire (point le plus aval du bassin), ainsi qu'aux échanges avec la nappe souterraine. Le bilan hydrologique (Figure 2) tient donc compte de toutes les entrées d'eau (P et +GW), les sorties d'eau (ET, Q, -GW), ainsi que de la variation temporelle de la quantité d'eau contenue dans le bassin (ΔS). Dans l'exemple de la Figure 2, si les quantités d'eau apportées par P et GW sont supérieures à celles perdues par Q, ET et GW, alors le bassin stocke de l'eau (ΔS positif). Cet excès d'eau doit être emmagasiné quelque part dans le bassin. Ce sont les sols qui jouent ce rôle en stockant la majeure partie de cette eau dans leurs pores.



Bilan hydrologique
$\Delta S = P - ET - Q \pm GW$

Figure 2: Schéma des principaux transferts d'eau dans un bassin versant. Les termes de l'équation représentent les précipitations (P), l'évapotranspiration (ET), le débit à l'exutoire (Q), les échanges profonds (GW) et la variation de stockage d'eau (ΔS).

Ce phénomène se traduit par une hausse du niveau de la nappe phréatique tel que schématisé à la Figure 3. À noter qu'une augmentation de 10 cm du niveau de la nappe ne correspond pas à un stockage de 10 cm d'eau, mais en fait beaucoup moins, car seuls les pores qui communiquent entre eux participent à l'écoulement et font fluctuer la nappe phréatique. Les spécialistes du sol appellent cette propriété physique, la porosité effective ($Ø_e$).

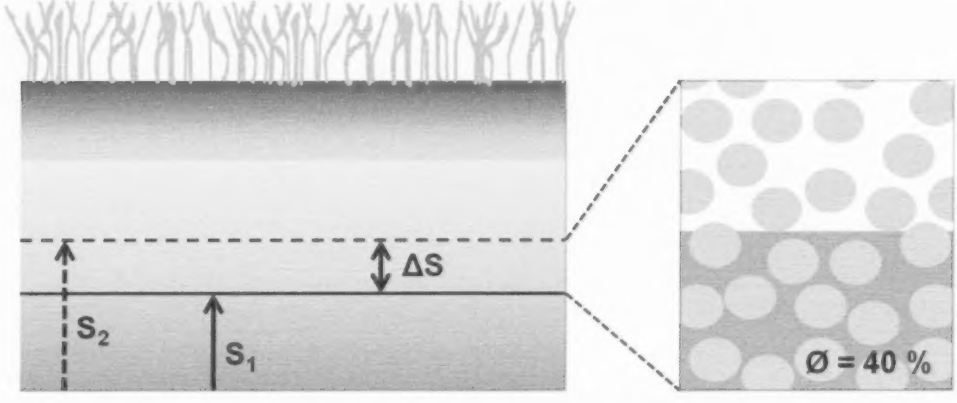


Figure 3: Schéma d'un profil de sol. S_1 et S_2 représentent deux conditions de stockage d'eau avec $S_2 > S_1$, ΔS est la variation de stockage d'eau et Ø la porosité du sol.

On distingue les types de tourbières selon leur hydrologie

Abordons maintenant notre sujet d'étude: les tourbières. Selon la définition canadienne, les tourbières sont des écosystèmes humides dont les sols contiennent plus de 40 cm de matière organique. Elles se divisent en deux groupes: ombrotrophe et minérotrophe (Figure 4). Ces deux groupes se différencient principalement par l'origine de leurs apports en eau. Dans le cas des tourbières ombrotrophes, les apports proviennent uniquement des précipitations, elles sont donc pauvres en éléments nutritifs. En revanche, les tourbières minérotrophes reçoivent à la fois des eaux de précipitations et des eaux de ruissellement issues des versants forestiers, elles sont donc moins pauvres en éléments nutritifs. Cette différence influence fortement l'écologie végétale de ces milieux ainsi que leur hydrologie. Les tourbières étant des milieux pauvres en nutriments, les plantes peu gourmandes en éléments nutritifs comme les sphaignes et les mousses y sont favorisées. Les sphaignes, des plantes caractéristiques des tourbières, acidifient le sol et le rendent inhospitalier pour la plupart des autres organismes. Dans une tourbière, la décomposition du couvert végétal est plus lente que son accumulation, ainsi la tourbe s'y accumule.

Figure 4: Végétation typique d'une tourbière ombrotrophe (haut) et d'une tourbière minérotrophe ennoyée (bas) du bassin de la Grande Rivière.

Le paradoxe des tourbières

En hydrologie, il est important de distinguer la porosité effective ($Ø_e$) de la porosité totale ($Ø_{tot}$) d'un sol. La porosité totale représente le volume des vides sur le volume total de sol. La porosité effective est formée uniquement par le volume des vides qui participent à l'écoulement (c.-à-d., le volume de la partie d'un réseau dont les pores sont assez gros pour éviter que les forces de succion ne retiennent les gouttelettes d'eau et ne les empêchent de s'écouler) sur le volume total de sol. Les sols tourbeux ont la particularité d'être très poreux ($Ø_{tot} > 75\%$), mais très peu drainant ($Ø_e < 20\%$) (Figure 5). Il n'est pas rare de mesurer des porosités totales supérieures à 85%. Dans les tourbières, cette porosité est largement occupée par de l'eau. Marcher sur une tourbière c'est donc comme marcher sur l'eau, fantastique non?

Une autre particularité de la tourbe est sa capacité à changer ses porosités (totale, effective) en fonction du niveau de la nappe phréatique. La tourbe tend à conserver son humidité: lorsque la nappe est basse, la tourbe se rétracte et lorsque la nappe est haute, la tourbe gonfle. L'altitude de l'interface sol-atmosphère s'en trouve ainsi modifiée. On dit alors que la tourbe « respire ».

Ces variations de porosité posent un problème à l'hydrologue, car le stockage (ΔS) dépend de la porosité. Ce phénomène de « respiration » peut cependant être estimé. Le paradoxe des tourbières est donc le suivant : bien que les tourbières soient constituées presque exclusivement d'eau (entre 70 et 90 %), la majeure partie de cette eau y est retenue (moins de 20 % participe à l'écoulement). On compare souvent les tourbières à des éponges : avec une nappe basse, la tourbière pourra stocker une bonne partie des eaux de précipitations, mais lorsque la nappe est haute, ses capacités de stockage vont être diminuées.

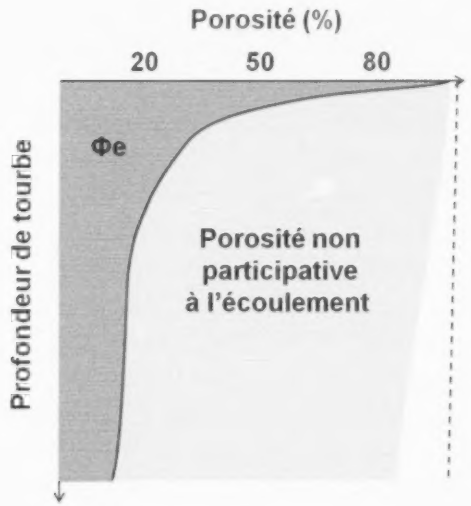


Figure 5 : Représentation graphique des porosités effective ($Ø_e$, celle qui participe à l'écoulement) et totale en fonction de la profondeur.

La boîte à outils de l'hydrologue

L'hydrologue peut mesurer certains termes du bilan hydrologique (P, Q), mais doit en estimer d'autres (ET, GW, ΔS) qui ne sont pas aisément mesurables. Les exemples suivants illustrent quelques-uns des instruments que notre équipe de recherche utilise sur le terrain.

Les précipitations (pluie et neige) sont mesurées à l'aide d'un précipitomètre (Figure 6A). Le débit à l'exutoire est obtenu grâce à la mesure en continu du niveau d'eau dans un canal rigide (Figure 6B). Ceci nous permet d'appliquer une relation connue entre la hauteur d'eau et le débit tout au long de la saison. L'évapotranspiration estivale est calculée à l'aide d'équations empiriques utilisant des données d'une station météorologique (Figure 6C). Ces équations sont adaptées à certains types de sol et nécessitent en général une correction. Les valeurs doivent être pondérées par un facteur qui tient compte de données réelles obtenues à l'aide de lysimètres à pesées (Figure 6D). Enfin, les écoulements verticaux entre les couches de surface et celles en profondeur sont mesurés à l'aide de tubes percés à la base nommés piézomètres (Figure 6E). Un apport profond d'eau se traduit par un niveau piézométrique plus élevé que le niveau de la nappe (le niveau d'eau dans le piézomètre dépasse celui de la nappe) et inversement. Il est aussi possible d'utiliser des traceurs chimiques pour estimer ces apports. Cette instrumentation nous permet de mesurer (P, Q) et d'estimer (ET, -GW et +GW) afin de calculer ΔS à partir de l'équation du bilan hydrologique. Cependant, l'estimation de certains termes engendre des erreurs et donc une imprécision dans les calculs. Il est nécessaire d'obtenir ΔS à l'aide de mesures réelles afin d'évaluer la précision de chacun des termes de l'équation. Pour ce faire, on doit connaitre le niveau de la nappe, les porosités effectives et l'oscillation du niveau du sol. Les fluctuations de la nappe sont mesurées à l'aide d'un capteur inséré dans un puits (tube percé sur toute sa longueur). Les porosités effectives en fonction de la profondeur sont mesurées en laboratoire. Enfin, l'oscillation du niveau du sol est obtenue à l'aide d'un système qui mesure le gonflement du sol (Figure 6F).

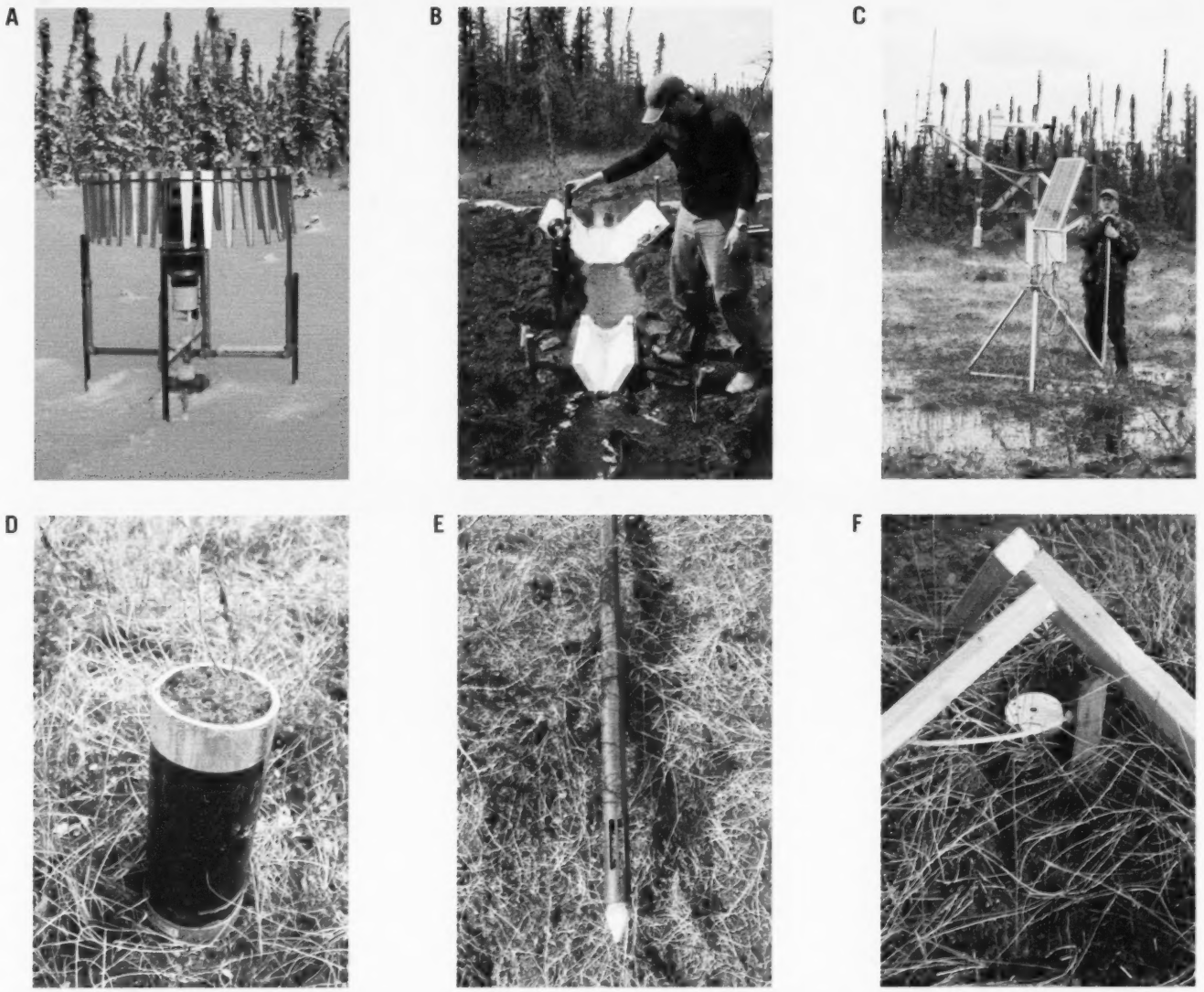


Figure 6: Instrumentation de terrain : précipitomètre (A), canal trapézoïdal (B), station météorologique (C), lysimètre (D), piézomètre (E), et trépied permettant la mesure de l'oscillation du sol (F).

Quelques résultats de nos recherches en cours

Nos travaux portent sur des tourbières ennoyées (c.-à-d., dont une importante proportion de la surface est recouverte de mares) du bassin versant de la Grande Rivière (Figure 7). Les résultats préliminaires obtenus apportent de nouvelles connaissances sur ces écosystèmes nordiques. Premièrement, les faibles conductivités hydrauliques de la tourbe (capacité de celle-ci à se laisser traverser par l'eau), ainsi que l'imperméabilité du sol minéral sous-jacent, empêchent les échanges significatifs d'eau avec les couches profondes (B, Figure 8). On peut donc, pour ces milieux, ignorer le terme ±GW ce qui simplifie l'équation du bilan hydrologique. Deuxièmement, les mesures d'évapotranspiration réalisées à l'aide de lysimètres ont permis de corriger les équations empiriques et d'obtenir une meilleure estimation

Figure 7 : Une des tourbières ennoyées à l'étude (photo : Sylvain Jutras).

des pertes d'eau par évapotranspiration qui représentent pas moins de 70 % des apports d'eau par la pluie (juin-octobre). Nos résultats ont de plus montré que le stockage peut être obtenu à partir d'un nombre restreint de paramètres, ce qui en facilite la modélisation.

Pour compléter notre étude, nous avons analysé les transferts d'eau à l'intérieur du bassin versant à l'aide de la chimie isotopique (hydrogène, oxygène). Les isotopes d'un même élément ont des masses atomiques différentes. La molécule d'eau peut être plus légère ou plus lourde selon sa composition isotopique. Certaines réactions physiques comme l'évaporation discriminent les molécules « lourdes » des molécules « légères ». Ainsi, en comparant la signature isotopique de différents échantillons d'eau prélevés dans le bassin, il nous est possible de retracer les processus subis par les molécules d'eau et de décrire l'écoulement (mélange, vitesse, origine, etc.). Au cours de l'été, nous avons prélevé plusieurs échantillons d'eau de pluie et dans différentes parties d'une tourbière (mares, partie forestière, à différentes profondeurs dans la tourbe, à l'exutoire). Nos résultats ont montré que dans cette tourbière ennoyée, il n'y a pas d'écoulement de surface (3a, Figure 8) lorsque la nappes souterraine est basse (loin de la surface du sol). L'eau qui s'écoule à l'exutoire (1, Figure 8) provient alors uniquement des mares le plus en aval et l'hydrologie de la tourbière fonctionne sur le principe de chutes d'eau entre une succession de petits réservoirs en escalier. Nos résultats ont aussi montré qu'en dessous de 50 cm de profondeur dans la tourbe, l'écoulement est faible et lent et contribue peu aux débits annuels (3b, Figure 8).

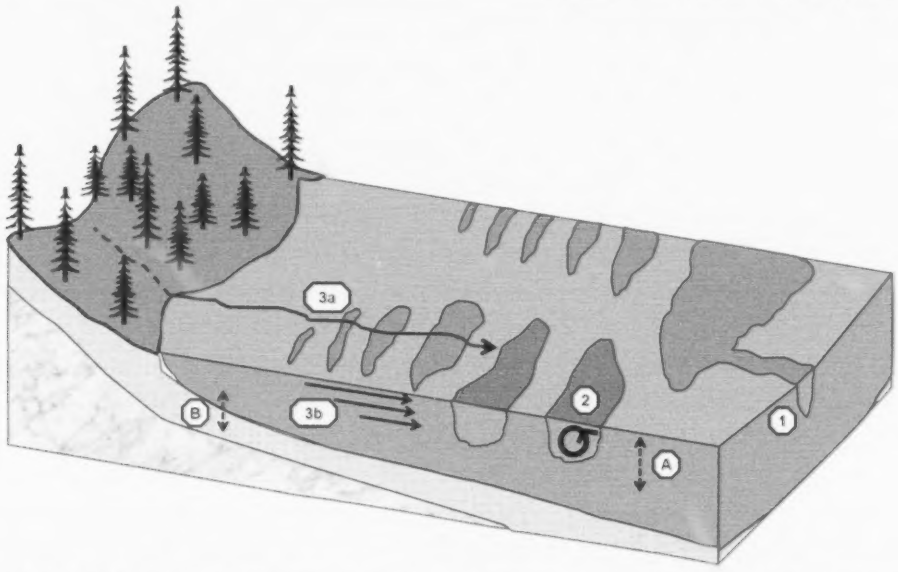


Figure 8 : Schéma des principaux écoulements au sein d'une tourbière minérotrophe ennoyée. Les chiffres représentent le débit à l'exutoire (1), le mélange des eaux dans les mares (2), le ruissellement de surface (3a), et les écoulements lents en profondeur (3b). Les lettres représentent les échanges d'eau au niveau des couches de surface (A) et à l'interface tourbe – sédiments (B).

Vers une prise en compte des tourbières dans les modèles hydrologiques

Nos recherches en cours devraient permettre d'adapter les modèles hydrologiques aux tourbières boréales. Ces modèles ont pour but en général d'estimer les débits à l'exutoire d'un bassin versant en fonction de variables météorologiques (pluie, température, etc.). Ces dernières sont normalement issues de prévisions météorologiques, mais peuvent aussi venir de simulations numériques tenant compte de différents scénarios de changements climatiques. Le modèle hydrologique comprend un grand nombre d'équations décrivant les écoulements d'eau dans un bassin versant. Les résultats de nos recherches, une fois complétées, pourront être pris en compte par ces équations et ainsi contribuer à améliorer les performances des modèles hydrologiques pour la région de la baie James. De futures recherches s'orienteront inévitablement vers l'adaptation de ces modèles à des territoires plus vastes que notre site d'étude. Ces nouvelles recherches devraient permettre d'améliorer les estimations des apports en eau aux réservoirs des barrages hydroélectriques et donc de faciliter leur gestion.

Pour en savoir plus...

Complexe La Grande

Suivi environnemental du complexe La Grande, Hydro-Québec – Développement durable
www.hydroquebec.com/developpementdurable/documentation/complexe_lagrande.html

Tourbières

Payette, S. et L. Rochefort (2001). Écologie des tourbières du Québec-Labrador. Presses de l'Université Laval, Québec, 644 p.

Groupe de recherche en écologie des tourbières (GRET), Université Laval
www.gret-perg.ulaval.ca

Hydrologie

Banton, O. et L. M. Bangoy (1997). Hydrogéologie : Multiscience environnementale des eaux souterraines. Presses de l'Université du Québec, Québec, 472 p.

Hingray, B., C. Picouet et A. Musy (2009). Hydrologie 2 : Une science pour l'ingénieur. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Suisse, 618 p.

André Musy. Cours d'hydrologie générale, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre1/main.html